

原子泉実現のための原子打ち上げ装置の開発

量子物質工学科 0113040 後藤亮彦

< 背景・目的 >

我々、中川研では原子干渉計を用いて重力加速度を測定することに成功している。原子干渉計とは図1に示すように、原子の内部および外部状態を2つに分け再び重ね合わせることによって光の干渉計と同じように干渉縞を観測する装置のことである。光の干渉計と一番異なる点は、光の粒子と異なり原子には質量があるため重力などの力と相互作用しやすいという点

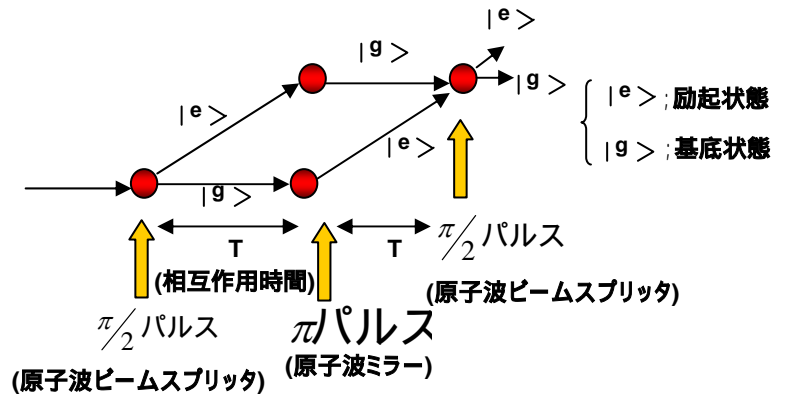


図1 (原子干渉計)

であり、これを利用することで重力加速度などを高感度で測定することが可能であると考えられる。図2が $T=10\text{ms}$ (T ; 図1におけるパルス間の時間) で得られたフリンジで、このフリンジの中心から重力加速度を求めることができる。現在中川研では重力加速度の感度は6桁まで達しているが、万有引力定数などを測定するためには感度を8桁程度までは上げなければならない。また、フリンジの周期は $\frac{1}{T^2}$ であるため T を増やすことでフリンジの中心の分解能があがり、位相感度の式 $\Delta\phi = k_{\text{eff}} \cdot gT^2$ より感度は T の二乗に比例するので T を1桁、つまり $T=10\text{ms}$ から $T=100\text{ms}$ に上げれば感度は6桁から8桁まであがると期待される。ここで T を 100ms 稼ぐ方法だが、単に

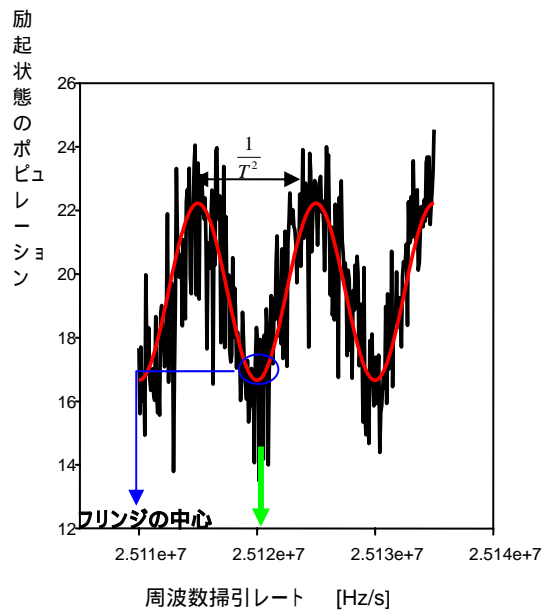


図2 ($T=10\text{ms}$ のフリンジ)

原子を落とす方法では 20cm 程落とさないとならないが図3のように原子泉という原子を打ち上げる方法を用いれば原子を 6cm 程打ち上げることで T を 100ms 稼ぐことができる。そのため、原子泉を用いて T を 100ms 稼ぎ測定感度を2桁上げようとしている。

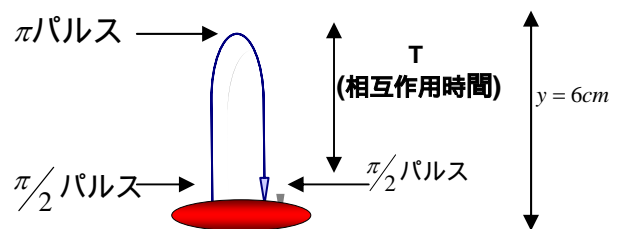


図3 (原子泉)

< 原子泉の原理 >

原子泉を実現するため、つまり原子を正確に真上に打ち上げるためには速度 v で打ち上がる原子がドップラーシフトにより、6方向からのレーザーの周波数をすべて同じ周波数と感じないとならないという条件がある。つまり、図4のように optical molasses 時に原子に対し6方向から照射しているレーザーの周波数を原子泉時には上からのレーザーの周波数を $-\delta\nu$ 、下からのレーザーの周波数を $+\delta\nu$ シフトさせ

水平方向のレーザーの周波数 = $\frac{\text{上からのレーザーの周波数} + \text{下からのレーザーの周波数}}{2}$

という関係をつくらなければならない。この条件が満たされている時は原子は6方向からのレーザーの周波数を全て同じと感じるため optical molasses 時と同じ条件になり原子は打ち上げの際にも冷却される。しかし、この条件が満たされていないと原子は加熱され複雑な速度成分を持つためどこかに行ってしまう観測することができなくなってしまう。

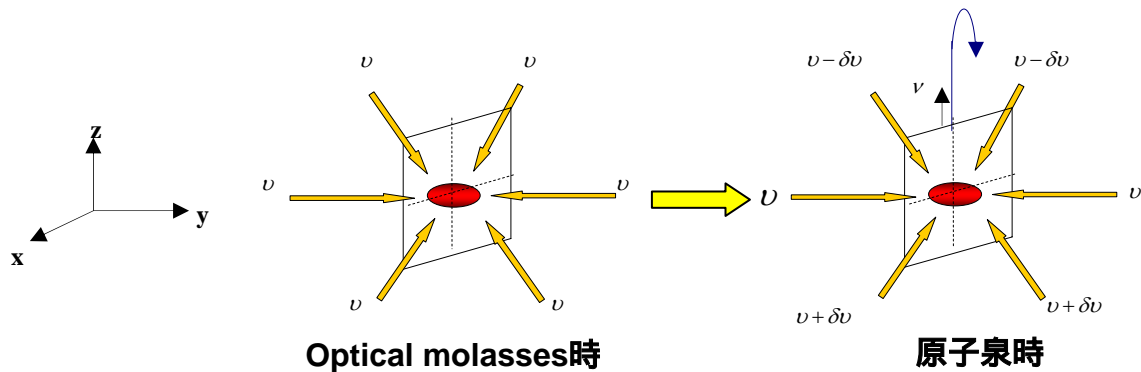


図4 (原子泉実現のための条件)

また、この条件を満たした時の原子の打ち上げ速度は

$$v = \frac{\lambda}{\cos \alpha} \delta\nu = \sqrt{2} \lambda \delta\nu (\alpha ; \text{レーザーの鉛直方向に対する角度})$$

と表すことができるので、原子泉を用いて $T = 100\text{ms}$ 稼ぐためには図5のように $\delta\nu$ を 1MHz とし原子を 6.1cm 打ち上げる必要がある。また、打ち上げの速度の式からも分かるように打ち上げの速度は $\delta\nu$ に依存しているため $\delta\nu$ が揺らいでしまうと速度 v も揺らいでしまい打ち上げの高さが毎回異なり実験の再現性がなくなってしまうので、 $\delta\nu$ は $1\text{MHz} \pm 100\text{Hz}$ 程度の精度で制御しなければならない。

以上より、私は原子泉実現のためにこれらの条件を満たす3つの同期のとれた AOM ドライバー (音響光学変調器) を開発した。

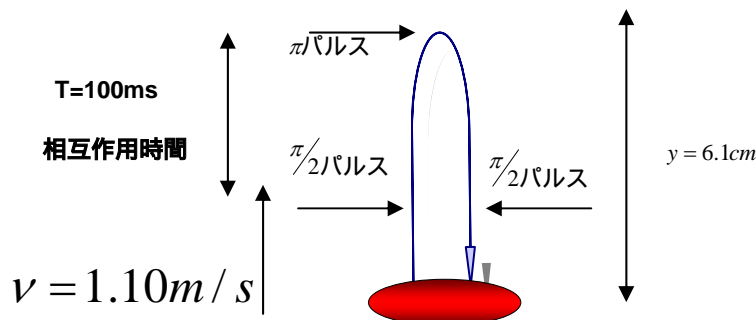


図5 ($\delta\nu$ を 1MHz とした時)

< 装置の概要 >

私が開発した装置の簡単な回路図は図6のようになっている。AOMに入れる周波数はDDS(Direct Digital Synthesizer)を用いていて、DDSのreference clock(30MHz)は1つのものを共通に使っているため3台のDDSからの周波数は同期のとれたものとなっている。また、DDSから出る周波数は60MHz程度までだが、実際にはcooling時にはAOMに97MHzの周波数を入れる予定なのでDoublersを用いて周波数を2倍にしている。またAttenuatorを使うことで外部からパワーのコントロールもできるような回路になっている。DDSを用いている利点としてはコンピューターでプログラムをつくることによって100usごとに周波数を正確に出すことができ、また位相も制御することができるという点がある。

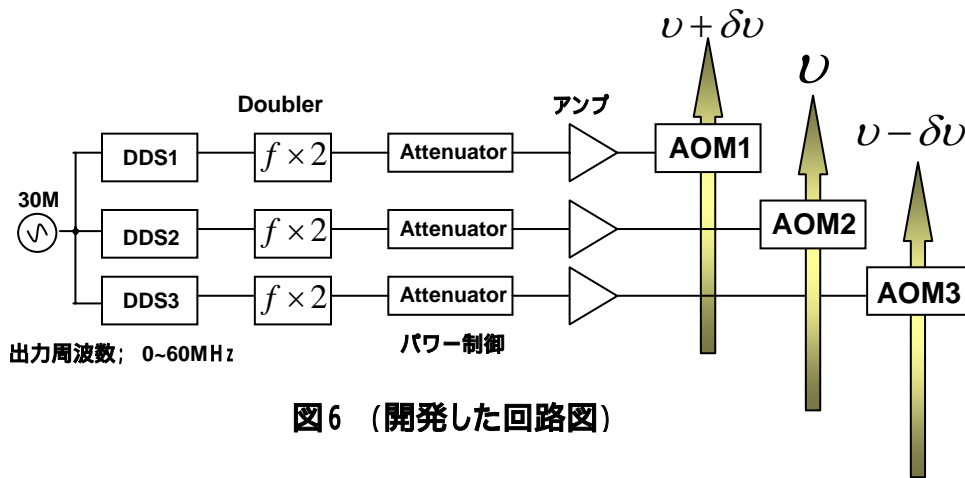


図6 (開発した回路図)

< 周波数シフトのタイミングチャート >

現時点で予定しているDDSの周波数シフトのタイミングチャートは図7のようになっている。まず、MOT時には3つのDDSからの周波数は同じ97MHzを出し、原子泉の際には原子泉の条件を満たす周波数にシフトさせ($\delta\nu$ は1MHzだが、実際にはAOMをダブルパスさせるのでAOMに入れる周波数差は0.5MHzでよい)、PGC(偏向勾配冷却)時には周波数を97MHz~67MHzまで掃引させる予定でいる。また、DDSでは100us毎に周波数を変えることができるのでPGC時の周波数の掃引も十分滑らかにできると考えられる。

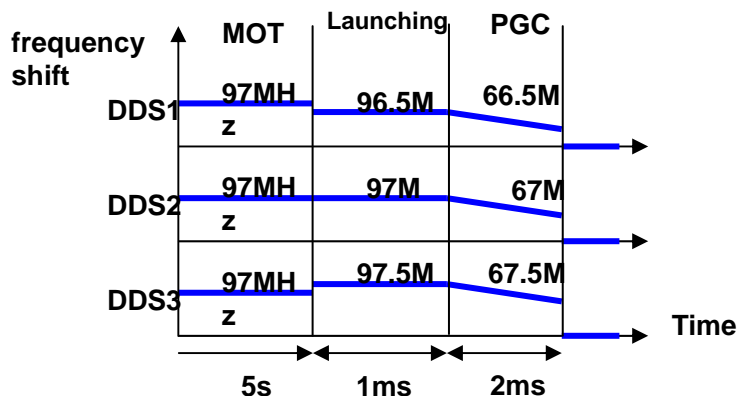


図7 周波数シフトのタイミングチャート

<装置の評価結果>

1 装置の評価として、まず最初に原子泉を行うための条件を満たしているかどうかを評価した。評価の方法としては図8のように DDS1 からの出力と DDS3 からの出力を Mixer に入れ和周波にし、その和周波をトリガーとしてオシロにいれ DDS2 からの出力を観測した。その結果 DDS2 の信号は左右に流れることなく静止していたので、このことから

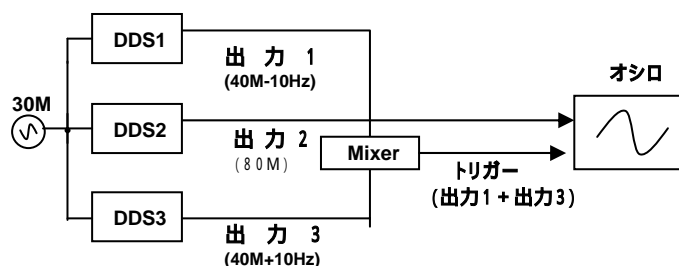


図8 (原子泉の条件を満たしているかの評価)

出力2 = 出力1 + 出力3 が数Hz の精度で満たされていることが評価できた。また出力1 は上からのレーザーの周波数、出力3 は下からのレーザーの周波数、 $\frac{\text{出力2}}{2}$ は水平方向のレーザーの周波数に相当することより、開発した装置は原子泉の条件を満たしているということが評価できた。

2 次に3つの DDS からの周波数が正確に同期しているかどうかを評価した。評価の方法は周波数を変えるトリガーがかかった時に3つの周波数が5MHzから10MHzに同期して変わるかどうかをデジタルオシロで観測した。評価結果は図9を見て分かるように、周波数を変えるトリガーが立ち上がってから100us程度のdelayの後ほぼ同時に周波数が5MHzから10MHzに変わっていたことが観測できた。このことから3つの DDS の周波数は同期して変わっていることが評価できた。

周波数を5MHzから10MHzに変えた

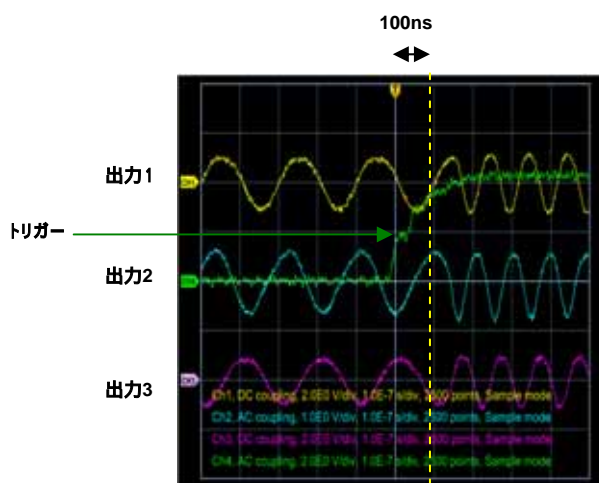


図9 (周波数同期の評価)

<今後の展望>

今後の展望としては、開発した装置を用いて原子に光を入れて、実際に原子が正確に真上に打ち上がるかどうかを評価するつもりである。